

Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Eucalyptus globulus* (Argentina) y su vinculación con la calidad de sitio y edad de plantación

Physical and mechanical wood properties of *Eucalyptus globulus* (Argentina), and its association with site quality and plantation age

Karen Moreno ^{a*} , Fabio Achinelli ^b , Pablo Stefani ^c ,
Silvia Monteoliva ^d , Eleana Spavento ^e 

* Autor de correspondencia: ^a Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ciencias Agrarias, Mar del Plata, Argentina, tel.: + 5492235516772, karenmoreno@mdp.edu.ar

^b Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC), La Plata, Argentina.

^c Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ingeniería, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA), Div. Materiales Sostenibles, Mar del Plata, Argentina.

^d Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Instituto de Fisiología Vegetal (INFIVE), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), La Plata, Argentina.

^e Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Laboratorio de Investigaciones en Madera (LIMAD), La Plata, Argentina.

ABSTRACT

The aim of this work is to study the physical and mechanical properties of *Eucalyptus globulus* wood from Buenos Aires (Argentina) and relate them to the site quality and planting age. 23 trees from 10 to 15 years old and with site index from 20.9 m to 34.4 m in height were sampled, which were sawn to obtain specimens. Physical properties (density, percentage of heartwood in relation to the area of the section, dimensional changes) and mechanical properties (static bending, hardness, and penetration resistance) were determined. The results showed that, regardless of the site or age, the wood had an average density of $699 \pm 57 \text{ kg m}^{-3}$, a heartwood percentage of $54 \pm 8 \%$, an anisotropy coefficient of 1.6 ± 0.2 , and elastic modulus of $10,934 \pm 3,034 \text{ MPa}$, modulus of rupture of $100.07 \pm 16.97 \text{ MPa}$ and Brinell hardness of $2.7 \pm 0.7 \text{ kN mm}^{-2}$. These values suggest that wood is suitable for good-quality sawn products, both for solid and reconstituted uses. The indices from higher sites produced wood with greater dimensional stability associated with lower anisotropy coefficients, without being associated with changes in density, heartwood content, and mechanical properties. Planting age only influenced heartwood content; older trees recorded higher heartwood content. The evaluated physical-mechanical properties were not correlated with growth parameters. A high correlation was observed between the penetration resistance with respect to the density and hardness and between the density and modulus of elasticity.

Keywords: density, heartwood, coefficient of anisotropy, static bending, hardness.

RESUMEN

El objetivo del trabajo es estudiar las propiedades físico- mecánicas de la madera de *Eucalyptus globulus* proveniente de Buenos Aires (Argentina), y relacionarlas con la calidad de sitio y la edad de plantación. Se muestrearon 23 árboles de 10 a 15 años, con índices de sitio de 20,9 m a 34,4 m de altura, que fueron aserrados para obtener probetas. Se determinaron propiedades físicas -densidad, porcentaje de duramen en relación al área de la sección y cambios dimensionales- y mecánicas -flexión estática, dureza y resistencia a la penetración-. Los resultados mostraron que, independientemente del sitio o edad, la madera presentó una densidad media de $699 \pm 57 \text{ kg m}^{-3}$, un porcentaje de duramen de $54 \pm 8 \%$, un coeficiente de anisotropía de $1,6 \pm 0,2$, módulo de elasticidad de $10.934 \pm 3.034 \text{ MPa}$, módulo de ruptura de $100,07 \pm 16,97 \text{ MPa}$ y dureza Brinell de $2,7 \pm 0,7 \text{ kN mm}^{-2}$. Esto sugiere que la madera es apta para productos aserrados, tanto para usos sólidos como reconstituidos. Los índices de sitios superiores produjeron madera con mayor estabilidad dimensional, asociada a menores coeficientes de anisotropía, sin estar asociados a cambios en la densidad, proporción de duramen y propiedades mecánicas. La edad de plantación solo influyó en la proporción de duramen; árboles de mayor edad registraron mayor proporción de duramen. Las propiedades físico-mecánica no se correlacionaron con parámetros de crecimiento. Se observó una correlación alta entre la resistencia a la penetración respecto a densidad y dureza, y entre la densidad y módulo de elasticidad.

Palabras clave: densidad, duramen, coeficiente de anisotropía, flexión estática, dureza.

INTRODUCCIÓN

El creciente interés por el uso de materiales constructivos sostenibles, que resulten más amigables con el medio ambiente y que contribuyan como sumideros de carbono a la mitigación del cambio climático, hacen de la madera un material cada vez más destacado (Araya *et al.* 2022). En consecuencia, la demanda de madera de especies cultivadas que presentan buenos atributos tecnológicos evoluciona crecientemente. En este sentido, la madera de *Eucalyptus globulus* Labill. (eucalipto blanco) tradicionalmente empleada en la industria papelera, ha evidenciado un interés creciente para usos sólidos, tanto en aplicaciones estructurales, como así también en mueblería y fabricación de productos laminados (Belleville *et al.* 2016, Moreno *et al.* 2018, Acuña *et al.* 2020). Por su parte, estudios recientes han demostrado que la madera estructural de *E. globulus*, proveniente de algunos países europeos, presenta mayor rendimiento mecánico que otras latifoliadas europeas (AENOR 2012, AENOR 2016, Lara-Bocanegra *et al.* 2017, 2020, Crespo *et al.* 2017, 2020).

En Argentina, *E. globulus* es plantado comercialmente en la región sudeste de la provincia de Buenos Aires donde presenta condiciones de sitio muy favorables para su desarrollo, traducidos en crecimientos medios anuales de $24,7 \text{ m}^3 (\text{ha año})^{-1}$ (MAA-BA 2011), con un rango de valores entre $9,4 \text{ m}^3 (\text{ha año})^{-1}$ a $49,7 \text{ m}^3 (\text{ha año})^{-1}$, correspondientes a valores de Índice de sitio de 15,7 a 36. Estos valores representan el crecimiento medio anual mínimo y máximo encontrado en plantaciones *E. globulus* establecidas en un radio de 100 km del Puerto de Quequén (Achinelli *et al.* 2017).

De acuerdo al primer inventario de macizos forestales, esta especie es considerada la segunda de importancia en superficie forestada para la provincia de Buenos Aires, siendo ésta, la única cuenca comercial de *E. globulus* en el país. Si bien la mayoría de las plantaciones de la región fueron establecidas con el fin de producir madera apta para chips (MAA-BA 2011), los cambios en el contexto económico ocurridos en los últimos 20 años han llevado a los productores a considerar otros nichos de mercado interno y externo, incluyendo la madera sólida (Achinelli *et al.* 2017). Una limitante en este sentido, es la falta de caracterización físico-mecánica de la madera producida en estas plantaciones originadas a partir de semillas de distintas procedencias y establecidos con una alta densidad de plantas ($1.111 \text{ plantas ha}^{-1}$ y superiores) para ser cosechados en rotaciones de alrededor de 10 años, y sobre los cuales no se efectuaron tratamientos silvícolas de poda y raleo (MAA-BA 2011). En este contexto, el conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de dicho recurso forestal creciendo en la región y con edades superiores a las estimadas originalmente, resulta fundamental para la evaluación de la madera destinada a usos sólidos.

Entre las propiedades físicas de importancia, la densidad, parámetro fuertemente heredable, tiene significativa vinculación con el rendimiento y la calidad del producto fi-

nal (Calvo *et al.* 2006). A su vez, está relacionada con otras propiedades físicas, como así también, con las propiedades mecánicas de flexión estática y dureza (Loulidi *et al.* 2012, Sánchez Gómez y Roa Lozano 2015).

En términos generales, las propiedades físico-mecánicas de la madera pueden ser modificadas por factores genéticos, ambientales, calidad de sitio, como así también por factores referentes al manejo silvícola, tales como realización de podas, raleos, y turno de corta (Stackpole *et al.* 2010, Loulidi *et al.* 2012, Miranda y Pereira 2015). En este sentido, diversos trabajos realizados con esta especie han relacionado la calidad de sitio y la densidad de la madera, aunque con resultados contradictorios (Miranda *et al.* 2001ab, Moreno e Igartúa 2015, Moreno *et al.* 2018). Sin embargo, hasta el momento no se han publicado trabajos que relacionen la calidad de sitio con la estabilidad dimensional o, bien con las propiedades mecánicas para *E. globulus*.

En lo que respecta a la influencia de la edad de plantación, existen antecedentes para esta especie donde se registran mejores propiedades físicas y mecánicas a mayor edad (Bermudez Alvite *et al.* 2002, Lemenih y Bekele 2004, 2010, Espinoza 2018). Asimismo, diversos trabajos coinciden en que la porción duraminizada del fuste se incrementa con la edad del árbol (Knapic *et al.* 2006, Miranda *et al.* 2006). Otros trabajos indican también que la proporción de duramen está relacionado al tamaño del árbol por lo que, para una misma edad, individuos de mayor diámetro y altura, presentan mayor proporción de duramen, el cual, a su vez, alcanza mayores alturas (Morais y Pereira 2007, Miranda *et al.* 2009, Monteoliva *et al.* 2012). Estos aspectos son importantes ya que están relacionados con mayor resistencia al deterioro por agentes bióticos y abióticos (durabilidad natural), menor higroscopicidad y consecuentemente, mayor estabilidad dimensional, y en términos generales, mejores propiedades de color y/o diseño, lo cual resulta relevante para el uso sólido de la madera (Knapic *et al.* 2006).

En este contexto, los objetivos del presente trabajo son: determinar las propiedades físico-mecánicas de la madera de *E. globulus* obtenida de plantaciones comerciales del sudeste de la provincia de Buenos Aires; evaluar las relaciones existentes entre dichas propiedades, el incremento anual del diámetro a la altura del pecho, la calidad de sitio y la edad de plantación; determinar la relación entre todas las propiedades evaluadas en ensayos destructivos, así como la relación entre densidad, dureza y resistencia a la penetración (no destructivo), analizando la factibilidad de usar este método no destructivo como predictor de las propiedades físico-mecánicas.

METODOLOGÍA

El material xilológico analizado se obtuvo durante la realización del inventario de macizos forestales del sudeste de la provincia de Buenos Aires (MAA-BA, 2011), a través del muestreo destructivo de los fustes de 23 árboles (tabla 1) localizados en 10 parcelas temporarias. La elec-

ción de estas parcelas se llevó a cabo buscando representar edades de plantación de 10 a 15 años y diferentes calidades de sitio (MAA-BA, 2011). Para la selección del factor sitio se consideró el Índice de sitio publicado por Achinelli *et al.* (2017) que se confeccionó para esta especie teniendo como referencia el método de la “curva guía” desarrollado por Clutter *et al.* (1983). El Índice de sitio representa la altura media, en metros, de los cien árboles de mayor diámetro, para un determinado sitio y a una edad determinada (en nuestro caso, 15 años). Por lo tanto, este parámetro se basa en la respuesta del crecimiento de los árboles a la condición de meso-micrositio de cada parcela de muestreo, y se expresa mediante una escala cuantitativa continua que permite comparar calidades de sitio entre rodales de diferente edad. El rango de Índice de sitio registrado para la zona se encuentra entre 15 y 36 (Achinelli *et al.* 2017), por lo tanto, el muestreo buscó obtener la mayor representatividad de Índices de sitios posible.

Una vez seleccionados los árboles a muestrear, se midió el diámetro a la altura del pecho con una cinta diamétrica. Posteriormente, se procedió a su apeo, medición de

altura total y trozado. El muestreo a lo largo del fuste se realizó a 3 alturas: 50 cm sobre nivel del suelo (base), 1,3 m del suelo (altura del pecho) y a 30 % de la altura total del árbol. De este material se extrajeron las probetas para la determinación de todas las propiedades físicas, mientras que para la determinación de las propiedades mecánicas se usó solo la troza basal, por ser un material apropiado para usos aserrables, y por no contar con suficiente material en las trozas superiores para realizar probetas de las dimensiones requeridas para estos ensayos.

El material fue acondicionado durante un año bajo cubierta a temperatura ambiente para lograr su secado natural hasta llegar a una humedad de equilibrio del 12 %.

Propiedades Físicas y Mecánicas. Para la determinación de los parámetros físicos de contenido de humedad, densidad básica, densidad aparente normal, contracción normal máxima radial, contracción normal máxima tangencial y coeficiente de anisotropía, se trabajó con probetas dimensionadas acorde a lo especificado en las normas indicadas en la tabla 2.

Tabla 1. Valores medios y desviación estándar de la edad, altura total, diámetro a la altura del pecho (DAP) según el rango de Índice de sitio de los 23 árboles de *E. globulus* muestreados.

Mean values and standard deviation of age, total height, diameter at breast height (DBH) according to site index range of the 23 *E. globulus* trees sampled.

Rango de Índice de sitio (m) *	Número de árboles muestreados	Edad promedio y desviación estándar (años)	Altura total promedio y desviación estándar (m)	DAP promedio y desviación estándar (cm)
20,9 - 25,2	4	14 ± 0	22,8 ± 3,24	28,8 ± 3,62
26,4 - 29,6	9	12,2 ± 1,99	23,8 ± 3,31	24,8 ± 5,13
30,6 - 34,4	10	13,4 ± 1,78	29,1 ± 2,76	25,7 ± 3,56

* Achinelli *et al.* 2017

Tabla 2. Material de ensayo: dimensiones, normas técnicas y número repeticiones.

Test material: dimensions, technical standards and number of repetitions.

Ensayo/parámetros determinados	Dimensión (mm)	Norma	Repeticiones
Propiedades Físicas			
Densidad básica	Semi rodela	TAPPI T258 om-94	368
Densidad aparente normal	20 x 20 x 20	IRAM 9544 (1973)	1.752
Contenido de humedad	20 x 20 x 20	9532 (1963)	1.752
Contracción normal máxima radial y tangencial; Coeficiente de anisotropía	20 x 20 x 50	UNE 56-533 (1977) IRAM 9543 (1966)	1.621
Proporción de duramen	Rodela		69
Propiedades Mecánicas			
Módulo de elasticidad; módulo de rotura	20 x 20 x 320 (luz: 280)	IRAM 9542 (1965)	118
Dureza Brinell	50 x 50 x 150	ISO 6506/ ASTM E 10	60
Profundidad penetración Pilodyn	50 x 50 x 150		60

La proporción de duramen se determinó mediante inspección visual de rodela pulidas, utilizando la diferenciación de color como criterio de apreciación. Esta proporción se expresó en términos de área de duramen respecto al área total de la sección transversal sin corteza. Para calcular las áreas, se asumió que las secciones transversales de las rodela y del duramen eran circulares, y se obtuvieron diámetros medios a partir del promedio de dos mediciones realizadas en sentido perpendicular (tabla 2).

Para la realización de los ensayos mecánicos de flexión estática y dureza Brinell se obtuvieron probetas elaboradas a partir de la troza basal de cada árbol (tabla 2). Para dichas determinaciones se empleó una máquina Universal de ensayo marca SHIMADZU UH 300 kN.

Sobre las probetas de ensayo, se realizaron evaluaciones no destructivas, mediante el empleo de Pilodyn, en 2 puntos de cada cara radial a fin de evaluar la resistencia a la penetración y correlacionarlo con la densidad y dureza Brinell. El procedimiento de determinación siguió el protocolo sugerido por el fabricante.

Posteriormente se realizó la determinación de la Dureza Brinell atendiendo al procedimiento establecido en la norma ISO 9506/ASTM E10, con una modificación en las dimensiones del material de ensayo (tabla 2). El procedimiento consistió en determinar la huella dejada por una esfera de acero de 10 mm de diámetro, al ser sometida a una carga de 3.000 kg. Se realizaron dos determinaciones por cada cara radial.

Posteriormente a la realización de los ensayos mecánicos, de cada probeta se extrajo una probeta de 20 mm x 20 mm x 20 mm en el caso de flexión estática y de 20 mm x 50 mm x 50 mm en el caso de dureza a fin de corroborar el contenido de humedad al momento del ensayo y su influencia en la determinación de las propiedades mecánicas. Además, en las mismas probetas se determinó la densidad aparente normal para evaluar la relación entre ésta y los parámetros de flexión y dureza.

Para el análisis estadístico se realizó un estudio descriptivo a través de medidas de posición y dispersión. Para evaluar las relaciones existentes entre propiedades, y entre éstas y el índice sitio, la edad de plantación, y el

incremento medio anual en diámetro a la altura del pecho (IMAdap.), se testearon en primer lugar los supuestos estadísticos de normalidad (Test Lilliefors KS y Kolmogorov-Smirnov), y de homocedasticidad (test de Levene o de Bartlett, acorde al test de normalidad). Posteriormente, se establecieron correlaciones de Pearson o Spearman, según correspondiese. Las correlaciones entre propiedades físicas, y entre éstas y el Índice de sitio, la edad y el IMAdap se realizaron usando el promedio por árbol de las determinaciones efectuadas en las trozas de la base, del Ap y del 30 % de la altura total del árbol. Las correlaciones entre propiedades mecánicas, y entre éstas y el Índice de sitio, la edad y el IMAdap se realizaron usando el promedio por árbol de las determinaciones efectuadas en las trozas de la base. Las correlaciones entre densidad aparente normal, la resistencia a la penetración y propiedades mecánicas, se relacionaron con los valores surgidos de determinaciones tomadas sobre las mismas probetas.

Para la realización de estos análisis se trabajó con el software R versión 3.5.1.

RESULTADOS

Propiedades Físicas. Conforme con los resultados obtenidos (tabla 3) esta madera se clasifica como semipesada con valores promedios de densidad aparente normal (a 15 % de CH, Coronel (1994)) que se encuentran dentro del rango de 551 kg m⁻³ a 750 kg m⁻³. Asimismo, esta madera se clasifica como estable frente a las variaciones en el contenido de humedad, con valores promedios de coeficiente de anisotropía que se encuentran dentro del rango 1,6 a 1,9 establecido por Coronel (1994).

Las relaciones entre las propiedades físicas, la densidad aparente normal y las contracciones, fueron altas y positivas ($r = 0,69$ para contracción normal máxima radial, $P < 0,001$; $r = 0,78$ para contracción normal máxima tangencial, $P < 0,001$). La densidad aparente normal y el coeficiente de anisotropía presentaron una relación moderada y negativa ($r = -0,47$, $P = 0,024$). Con respecto a la proporción de duramen, no se detectó correlación entre dicho parámetro y las densidades ($P > 0,05$). Sin embargo,

Tabla 3. Propiedades físicas: valores medios, desvío estándar e intervalo de confianza.

Physical properties: mean values, standard deviation and confidence interval.

	Densidad Básica (kg m ⁻³)	Densidad aparente normal (kg m ⁻³)	Proporción de duramen (%)	Contracción normal máxima radial (%)	Contracción normal máxima tangencial (%)	Coficiente de anisotropía (adimensional)
Valor medio	552	699	54	6,9	11,2	1,6
Desviación estándar	46	57	8	1,9	2,5	0,2
Intervalo de confianza($\alpha = 0,05$)	533,27 570,73	675,63 722,37	50,73 57,27	6,10 7,70	10,18 12,22	1,52 1,68

se observó una correlación moderada y negativa ($r = -0,45$, $P = 0,003$) entre la proporción de duramen y el coeficiente de anisotropía.

Propiedades Mecánicas. De acuerdo con los resultados obtenidos (tabla 4) y el rango establecido por Mörath en Lohmann (1991) para valores de dureza Brinell (2 kN mm⁻² a 4 kN mm⁻²), para maderas blandas y duras, respectivamente, como así también a los valores de profundidad de penetración medidos por el Pilodyn, esta madera se clasifica como semi-dura.

Al analizar la relación entre las propiedades mecánicas, y entre éstas y la densidad, se observó una correlación alta y negativa entre la profundidad de penetración y los valores de dureza Brinell, y entre la profundidad de penetración y los valores de densidad ($r = -0,80$, $P < 0,001$;

$r = -0,75$, $P < 0,001$, respectivamente). Por su parte, se observó una correlación alta y positiva entre la densidad aparente normal y el módulo de elasticidad ($r = 0,76$, $P < 0,001$), y entre el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura ($r = 0,91$, $P < 0,001$). Asimismo, se observó una correlación moderada y positiva entre la dureza Brinell y el módulo de elasticidad ($r = 0,69$, $P < 0,001$).

En cuanto a la relación entre las propiedades físico-mecánicas y el incremento medio anual del diámetro a la altura del pecho (IMAdap), no se observaron correlaciones significativas ($P > 0,05$),

Influencia de la Calidad de Sitio. Cuando se analizó la variación de las propiedades físicas de la madera en relación al Índice de sitio (figura 1), se observó una correlación inversa y significativa entre el Índice de sitio y el coeficien-

Tabla 4. Propiedades mecánicas: valores medios, desvío estándar e intervalo de confianza.

Mechanical properties: mean values, standard deviation and confidence interval.

	Dureza Brinell ¹ (kN mm ⁻²)	Profundidad penetración ² (mm)	Flexión estática ³	
			Módulo de elasticidad (MPa)	Módulo de ruptura (MPa)
Valor medio	2,7	5,73	10.934	100,07
Desviación estándar	0,7	1,20	3.034	16,97
Intervalo de confianza ($\alpha = 0,05$)	2,41	5,24	9.696	93,15
	2,99	6,22	12.172	106,99

¹Valor determinado con un contenido de humedad promedio de 12,4 %; ²Determinación realizada con pilodyn; ³Valor obtenido con un contenido de humedad promedio de 11,9 %.

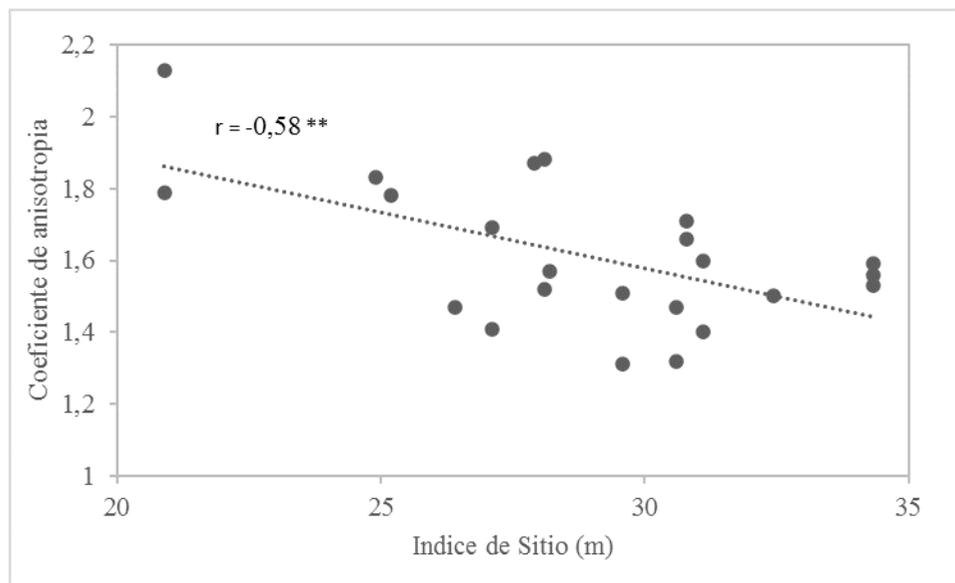


Figura 1. Relación entre el coeficiente de anisotropía y el Índice de sitio (coeficiente de correlación de Pearson; ** = $P < 0,01$ diferencia significativa)

Relationship between the anisotropy coefficient and the Site Index (Pearson correlation coefficient; ** = $P < 0.01$ significant difference)

te de anisotropía ($r = -0,58$; $P = 0,003$). En el caso de la densidad y la proporción de duramen, se observó una tendencia positiva no significativa ($P > 0,05$) en sus valores a medida que el Índice de sitio aumentó.

Al analizar la variación de las propiedades mecánicas, se observó que los valores de Índice de sitio no se asociaron significativamente ($P > 0,05$) con los valores de dureza Brinell, ni con los parámetros de flexión estática (módulo de elasticidad y módulo de ruptura). Sin embargo, se observó una tendencia positiva no significativa ($P > 0,05$) entre los valores de módulo de elasticidad e Índice de sitio.

Influencia de la Edad de plantación. Al analizar la influencia de la edad de plantación se observó una correlación positiva entre esta variable y la proporción de duramen ($\rho = 0,49$; $P = 0,018$) (figura 2), mientras que la densidad básica, la densidad aparente normal, el coeficiente de anisotropía y las propiedades mecánicas no se vieron asociadas a la edad de plantación en el rango de edad analizado (10-15 años) ($P > 0,05$).

DISCUSIÓN

La madera de *E. globulus* de 10 - 15 años obtenida de plantaciones forestales del sudeste bonaerense resultó semipesada, con alta proporción de duramen y con parámetros de cambios dimensionales adecuados que hacen prever un comportamiento estable frente al secado. En cuanto a las propiedades mecánicas, la madera resultó semidura, con valores de resistencia en flexión estática adecuados para usos estructurales, en relación a su edad de plantación.

Por su parte, estudios llevados a cabo en diversos países y en un rango de edad comparable al analizado, reportan resultados similares a los aquí encontrados en lo que respecta a densidad, cambios dimensionales y la proporción de duramen de la madera de *E. globulus*. (Miranda *et al.* 2001ab, 2015, McKinley *et al.* 2002, Lemenih y Bekele 2004, Morais y Pereira 2007, Monteoliva *et al.* 2012, Belleville *et al.* 2016). Contrariamente a los resultados aquí obtenidos, ensayos de dureza Brinell (López y Rozas 2016), dureza Janka y resistencia a la penetración realizados para esta misma especie plantada en Perú, la clasifican como madera dura indicando un rango de valores de dureza Brinell de $4,13 \text{ kN mm}^{-2}$ a $6,56 \text{ kN mm}^{-2}$ (Mescco y Quispe 2018), pero sin reportar la edad de los árboles de donde se extrajo la madera. Asimismo, diversos estudios en su mayoría obtenidos de madera extraída de árboles de mayor edad que los evaluados en este trabajo, reportan valores dispares de parámetros de flexión (MOE y MOR), superiores e inferiores a los obtenidos en este trabajo. Los valores de MOE reportados varían entre 8.994 MPa y 22.272 MPa , y los del módulo de ruptura entre $81,98 \text{ MPa}$ y 142 MPa (Bermúdez Alvite *et al.* 2002, Lemenih y Bekele 2004, López y Rozas 2016, Crespo *et al.* 2017, 2020).

En el contexto de las maderas latifoliadas comerciales de Argentina, la especie *Eucalyptus grandis* se sitúa como una de las principales fuentes de materia prima para aserrado. En este sentido, al comparar los valores obtenidos en el presente estudio con los valores informados por Sánchez Acosta *et al.* (2005) en madera de *E. grandis* de 17 años de edad (35 cm de diámetro a la altura del pecho y 39 m de altura), se pueden observar mejores valores de densidad y coeficiente de anisotropía para la madera de *E. globulus*.

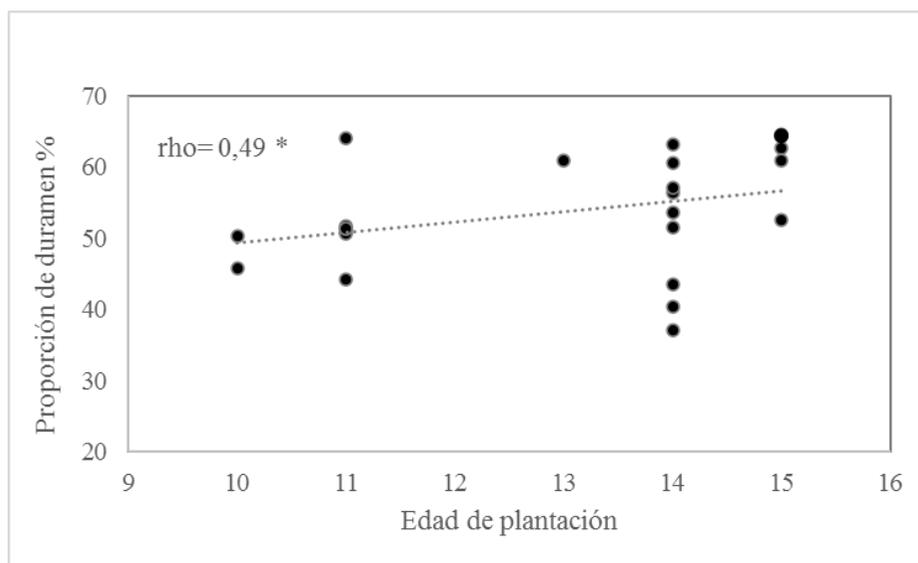


Figura 2. Relación entre la proporción de duramen de la madera con la edad de plantación (coeficiente de correlación de Spearman-rho; * = $P < 0,05$ diferencia significativa).

Relationship between the heartwood content of the wood and the plantation age (Spearman-rho correlation coefficient; * = $P < 0.05$ significant difference).

Por otra parte, si bien las dimensiones de las muestras y las metodológicas utilizadas son diferentes, es relevante destacar que los parámetros de flexión hallados en el presente trabajo (MOE 10.934 MPa) resultan promisorios comparados con los valores elasto-resistentes de otras especies de madera comercializadas en Argentina para uso sólido y encolado e incluidas en el Reglamento de Estructuras en Madera (CIRSOC 601). En este sentido, la madera de *E. grandis*, *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, *Populus deltoides* W.Bartram ex Marshall (“Australiano 129/60” y “Stoneville 67”) y *Pinus taeda* L., *P. elliottii* Engelm. presentan valores de MOE de 12.500 MPa, 11.500 MPa, 9.000 MPa y 7.000 MPa, respectivamente, que se corresponden con la clase 2 de clasificación visual por resistencia (IRAM 956 -1, -2, -3, -4).

Al analizar las relaciones entre propiedades físicas, se observaron correlaciones moderadas y negativas entre la densidad normal aparente y coeficiente de anisotropía, y entre éste y la proporción de duramen. Esto sugiere, que una madera con mayor contenido de duramen y densidad podría resultar más estable frente al secado.

Al analizar las relaciones entre las propiedades mecánicas y la densidad, se observaron resultados congruentes con investigaciones previas sobre madera aserrada de diversas especies de latifoliadas que exhiben densidades comparables a las presentadas en este estudio para *E. globulus* (Cañas Gutiérrez 2013, Peral 2014). En este contexto, el presente estudio reveló una correlación significativa y negativa entre la profundidad de penetración, la dureza y la densidad, y una correlación significativa y positiva entre el módulo de elasticidad y la densidad. En este sentido, Elissetche *et al.* (2024) encontraron una correlación alta y significativa entre resistencia a la penetración y densidad en híbridos de *E. nitens* × *E. globulus* de 10 años de edad, en concordancia con lo observado en el presente trabajo. Estos resultados sugieren, que tanto el empleo de herramientas no destructivas, como el Pilodyn, y/o la evaluación destructiva, como por ejemplo la determinación de la densidad, pueden considerarse métodos eficaces para la estimación de parámetros relacionados con la flexión y la dureza en madera de *E. globulus*.

En lo que respecta a la densidad y los parámetros de crecimiento, en coincidencia a lo obtenido en este trabajo, diversos autores reportan en madera de la misma especie y edades similares a las analizadas en este estudio, ausencia de correlación entre la densidad y el parámetro de crecimiento referido al diámetro a la altura del pecho (Miranda *et al.* 2001ab, Igartúa y Monteoliva 2010). Por su parte, Stackpole *et al.* (2010) realizaron un estudio sobre un ensayo de progenie de *E. globulus* en Tasmania y destacan que las correlaciones genéticas entre el diámetro a la altura del pecho y la densidad varían según la edad de análisis (ontogenia). Por lo tanto, es posible que las relaciones observadas en este estudio se modifiquen para otros rangos de edades.

Al analizar la influencia del sitio de plantación sobre las propiedades de la madera, este estudio mostró una ten-

dencia positiva esperable, aunque no significativa, entre la calidad de sitio respecto a la densidad y la proporción de duramen de esta madera, en coincidencia con lo informado por Miranda *et al.* (2001a), Morais y Pereira (2007) y Elissetche *et al.* (2024). Además, mostró que la calidad de sitio afecta significativamente a la estabilidad de la madera: a mayor calidad del sitio, mayor estabilidad dimensional.

Al analizar la influencia de la edad de plantación en relación con las propiedades de la madera de *E. globulus*, se destaca que dentro del rango analizado (10 - 15 años) dicha variable tiene un impacto significativo en la proporción de duramen; árboles de mayor edad reportan mayor proporción de duramen. En este sentido, diversos estudios sobre la misma especie y en un rango de edad inferior o similar al analizado reportan valores diversos, con resultados inferiores o semejantes a los obtenidos en este trabajo (Gominho y Pereira 2000, 2005, McKinley *et al.* 2002, Lemenih y Bekele 2004, Knapic *et al.* 2006, Miranda *et al.* 2006, Monteoliva *et al.* 2012). En términos generales, estos resultados sustentan la posibilidad de uso como productos de madera maciza dado que una mayor proporción de duramen se asocia con mayor estabilidad y durabilidad natural (Knapic *et al.* 2006).

Lo antes expuesto podría indicar que la selección de turnos de corta mayores y sitios de calidad superior, redundaría en una mayor proporción de duramen, y, en consecuencia, en la mejora de las propiedades asociadas como la estabilidad dimensional.

CONCLUSIÓN

La madera de *Eucalyptus globulus* proveniente de plantaciones forestales del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina) es semipesada, presenta alta proporción de duramen y parámetros de cambios dimensionales que permitirían un comportamiento estable frente al proceso de secado. En cuanto a las propiedades mecánicas, la madera resulta semidura y los parámetros de flexión estática promisorios para uso estructural, considerando el rango edad de plantación analizado (10 - 15 años), que es menor al que habitualmente se emplea cuando la madera es destinada a fines sólidos. En términos generales, las variables tecnológicas de la madera evaluada en relación al Índice de sitio y a la edad de plantación no muestran diferencias significativas, lo que podría sugerir que el material resultaría homogéneo desde el punto de vista de las propiedades físico-mecánicas analizadas, lo cual es alentador desde la óptica industrial.

De acuerdo con esto, dicha madera presenta un potencial tecnológico para la obtención de productos aserrados de madera sólida y/o reconstituida, lo cual debería vincularse con manejo silvícola adecuado y con el estudio y la aplicación de programas específicos de secado, a fin de lograr un mejor rendimiento y calidad del producto final.

Por otra parte, el presente trabajo podría servir como punto de partida para futuras investigaciones que, de con-

tar con la disponibilidad de material, permitan evaluar los valores elasto-resistentes de piezas de madera que puedan ser incluidas como material estructural.

Las relaciones evaluadas entre propiedades sugieren que el uso de herramientas no destructivas, así como la determinación de la densidad, pueden considerarse métodos eficaces para estimar parámetros relacionados con la flexión y la dureza en madera de *E. globulus*.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Moreno Karen, Monteoliva Silvia, Spavento Eleana: contribuyeron en el diseño experimental, la realización de ensayos, el análisis de datos, la interpretación de los resultados, armado de la discusión y preparación del manuscrito. Achinelli Fabio: contribuyó en el análisis estadístico e interpretación de los resultados. Stefani Pablo: contribuyó en la interpretación de los resultados y la discusión.

FINANCIAMIENTO

Estos estudios han sido financiados a través del Proyecto de Investigación y Desarrollo 2020 -PID A354- Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, y del Proyecto de Investigación Científica y Tecnológica -PICT 2018-02510-, Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCyT), Argentina.

REFERENCIAS

- Achinelli F, J Goya, S Galarco, L Larriue, M Arturi. 2017. Ajuste preliminar de un modelo de rendimiento para *Eucalyptus globulus* labill. en macizos del sudeste de la provincia de Buenos Aires. XXXI *Jornadas Forestales de Entre Ríos Concordia*, Argentina. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/72840>
- Acuña L, F Sepiarsky, E Spavento, RD Martínez, JA Balmori. 2020. Modelling of Impact Falling Ball Test Response on Solid and Engineered Wood Flooring of Two Eucalyptus species. *Forests*, 11(9): 933. DOI: <https://doi.org/10.3390/fl1090933>
- AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). 2012. UNE-EN 1912. Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0049485>
- AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). 2016. UNE-EN 338. Madera estructural. Clases resistentes, Madrid, España. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0057443>
- Araya R., A Guillaumet, A do Valle, MP Duque, G González, JM Cabrero, E De León, F Castro, C Gutiérrez, J Negro, L Moyá, P Guindos. 2022. Development of Sustainable Timber Construction in Ibero-America: State of the Art in the Region and Identification of Current International Gaps in the Construction Industry. *Sostenibilidad* 14(3): 1170. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14031170>
- Belleville B, P Ashley, B Ozarska. 2016. Wood machining properties of australian plantation-grown eucalypts. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 18(4): 677–688. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000059>
- Bermúdez Alvite J, M Touza Vázquez, F Sanz Infante. 2002. Manual de la Madera de Eucalipto Blanco. Fundación para o Fomento da Calidade Industrial e Desenvolvemento Tecnolóxico de Galicia. Ourense, España. 145 p. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/362059634_Manual_Madera_Eucalipto_Blanco
- Calvo C, A Cotrina, A Cuffré, JC Piter, PM Stefani, E Torrán. 2006. Variación radial y axial del hinchamiento, del factor anisotrópico y de la densidad, en el *Eucalyptus grandis* de Argentina. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 8(3): 159–168. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/MCT/article/view/1463>
- Cañas Gutiérrez I. 2013. Capacidad de predicción del penetrómetro “Pilodyn” en la determinación de la densidad de la madera. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/4682>
- Clutter J, J Fortson, L Pienaar, G Brister, R Bailey. 1983. Timber Management: A Quantitative Approach. J. Wiley and Sons ed. 333 p. Nueva York EEUU.
- Coronel E. 1994. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de la madera. Aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades y sus aplicaciones.1 Parte: Fundamentos de las propiedades físicas de la madera. ITM - UNSE. 187 p.
- Crespo J, JR Aira, C Vázquez, M Guaita. 2017. Comparative analysis of the elastic constants measured via conventional, ultrasound, and 3-D digital image correlation methods in *Eucalyptus globulus*. *BioResources*. 12(2): 3728-3743. DOI: <https://doi.org/10.15376/BIO-RES.12.2.3728-3743>
- Crespo J, A Majano-Majano, AJ Lara-Bocanegra, M Guaita. 2020. Mechanical Properties of Small Clear Specimens of *Eucalyptus globulus* Labill. *Materiales* 13(4): 906. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13040906>
- Elissetche J, R Alzamora, Y Espinoza, V Emhart, M Pincheira, A Medina, R Rubilar. 2024. Wood Basic Density Assessment of Eucalyptus Genotypes Growing under Contrasting Water Availability Conditions. *Forests* 15: 185. DOI: <https://doi.org/10.3390/fl15010185>
- Espinoza Tarrillo G. 2018. Estudio de la influencia de la edad del árbol en las propiedades mecánicas de la madera eucalipto en el distrito Bambamarca. Tesis. Universidad de Cesar Vallejo. Facultad de Ingeniería. Cajamarca–2018. Chiclayo-Perú. 162p. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.12692/27660>
- Gominho J, H Pereira. 2000. Variability of heartwood content in plantation-grown Eucalyptus globulus Labill. *Wood and Fiber Science* 32(2): 189-195. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/580>
- Gominho J, H Pereira. 2005. The influence of tree spacing in heartwood content in *Eucalyptus globulus* Labill. *Wood and Fiber Science* 37(4): 382-390. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/792>

- Igartúa D, S Monteoliva. 2010. Densidad básica, longitud de fibras y crecimiento en dos procedencias de *Eucalyptus globulus* en Argentina. *Bosque* 31(2): 150-156. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002010000200008>
- Knapić S, F Tavares, H Pereira. 2006. Heartwood and sapwood variation in *Acacia melanoxylon* R. Br. trees in Portugal. *Forestry* 79(4): 371-380. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpl010>
- Lara-Bocanegra AJ, A Majano-Majano, J Crespo, M Guaita. 2017. Finger-jointed *Eucalyptus globulus* with 1C-PUR adhesive for high performance engineered laminated products. *Materiales de construcción y Construcción* 135: 529-537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.004>
- Lara-Bocanegra AJ, A Majano-Majano, F Arriaga y M Guaita. 2020. *Eucalyptus globulus* finger jointed solid timber and glued laminated timber with superior mechanical properties: Characterisation and application in strained gridshells. *Materiales de Construcción y Construcción* 265: 120355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120355>
- Lemenih M, T Bekele. 2004. Effect of age on calorific value and some mechanical properties of three *Eucalyptus* species grown in Ethiopia. *Biomasa y Bioenergía* 27(3): 223-232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.01.006>
- López Carrasco J, JE Rozas Farfán. 2016. Análisis de la resistencia en relación al contenido de humedad para la aplicación en elementos sometidos a esfuerzos de flexión usando madera de eucalipto *globulus* de la provincia de Acomayo. Tesis Universidad Andina de Cusco. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Cusco – Perú. 207 p. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12557/723>
- Loulidi I, A Famiri, M Chergui, M Elghorba. 2012. The physical and mechanical properties of *Eucalyptus* hybrid *E. camaldulensis* x *E. grandis*: Comparison with its parental species. *International Journal of Engineering and Science* 1(1): 1-7. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:212559593>
- MAA (Ministerio de Asuntos Agrarios). 2011. Buenos Aires, Argentina. Inventario de macizos forestales de *Eucalyptus globulus* en el Sudeste de la Provincia de Buenos Aires. 30 p. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en: https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/80003/mod_resource/content/1/Inventario%20Macizos%20E.%20globulus%20SE%20Bonaerense%202010-2011.pdf
- McKinley R, C Shelbourne, C Low, B Penellum, M Kimberley. 2002. Wood properties of Young *Eucalyptus nitens*, *E. globulus* and *E. maidenii* in Northland, New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science* 32(3): 334-356. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/290694306_Wood_properties_of_young_Eucalyptus_nitens_E_Globulus_and_E_Maidenii_in_Northland_New_Zealand
- Mesco Quispe B, YM Quispe Pimentel. 2018. Evaluación comparativa de la madera balsamo (*Myroxylon balsamum*) frente a la madera de eucalipto *globulus* (*Eucalyptus globulus*) para su uso como elementos estructurales según la norma técnica peruana e. 010 y su clasificación en función a su dureza janka. Tesis Universidad Andina de Cusco. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Cusco – Perú. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12557/2417>
- Miranda I, M Almeida, H Pereira. 2001a. Influence of provenance, subspecies, and site on wood density in *Eucalyptus globulus* Labill. *Wood and Fiber Science* 33: 9-15. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/66>
- Miranda I, M Almeida, H Pereira. 2001b. Provenance and site variation of wood density in *Eucalyptus globulus* Labill. at harvest age and its relation to a non-destructive early assessment. *Forest Ecology and Management* 149(1-3): 235-240. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00560-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00560-0)
- Miranda I, J Gominho, A Lourenço, H Pereira. 2006. The influence of irrigation and fertilization on heartwood and sapwood content in 18-year-old *Eucalyptus globulus* trees. *Canadian Journal of Forest Research* 36(10): 2675-2683. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/x06-130>
- Miranda I, J Gominho, H Pereira. 2009. Variation of heartwood and sapwood in 18-year-old *Eucalyptus globulus* trees grown with different spacing. *Trees* 23(2): 367-372. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0285-9>
- Miranda I, Pereira H. 2015. Variation of wood and bark density and production in coppiced *Eucalyptus globulus* trees in a second rotation iForest - *Biogeociencias y Silvicultura* 9: 270-275. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer1442-008>
- Monteoliva S, V Ciganda, D Igartúa. 2012. Proporción de duramen y de albura en *Eucalyptus globulus* y *Acacia melanoxylon* implantadas en Argentina. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 14(1): 53-63. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2012000100005>
- Morais M, H Pereira. 2007. Heartwood and sapwood variation in *Eucalyptus globulus* Labill. trees at the end of rotation for pulp wood production. *Annals of Forest Science* 64: 665-671. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:2007045>
- Mörath en Lohmann U 1991 Holz Handbuch. 4 Aufl. DRW Verlag 312 tomado de Kordsachia Bekele. 2021. Industrial Applicability of Wood Anatomical, Mechanical and Physical Properties of Diverse Tree Species in Sudan. *Revista de agricultura y ciencia ambiental* 1(2): 33-41. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en: <http://8.218.148.162:8081/JAES/article/view/241>
- Moreno K, D Igartúa. 2015. *Eucalyptus globulus* en el sudeste de la provincia de Buenos Aires: edades, procedencias y densidad de la madera. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1669-23142015000200006
- Moreno K, E Spavento, S Monteoliva. 2018. Variabilidad en la anatomía y densidad de la madera de *Eucalyptus globulus*: análisis preliminar del efecto de la procedencia, suelo y edad. *Revista de la Facultad. Agronomía, La Plata* 117(1): 163-170. DOI: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/93371>
- Peral Andrés M. 2014. Estimación de la densidad de madera de *Populus x euramericana* 1-214, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* y *Quercus pyrenaica* mediante penetrómetro. Tesis Master Universidad de Valladolid. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Palencia, España. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/6567>
- Sánchez Acosta M, N Zakowicz, L Harrand, A Cuffre, E Torran, Calvo, J Piter. 2005. Propiedades físico mecánicas de la madera de *Eucalyptus grandis* de las procedencias genéticas: Kendall (Australia), Huerto semillero de Sudáfrica y semilla local Concordia, plantadas comercialmente en Ar-

gentina. Congreso Mundial IUFRO 2005. Brisbane-Australia. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/331284078_Propiedades_fisico_mecanicas_de_la_madera_de_Eucalyptus_grandis_de_las_procedencias_geneticas_Kendall_Australia_huerto_semillero_de_Sudafrica_y_semilla_local_Concordia_plantadas_comercialmente_en_Argentina

Sánchez Gómez DC, S Roa Lozano. 2015. Correlación entre la densidad y la flexión estática para *Eucalyptus globulus* La-

bill. procedente de la sabana Cundiboyacense. Tesis Universidad distrital Francisco Jose de Caldas Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Bogotá, Colombia. Consultado el 30 dic. 2023. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11349/4915>

Stackpole D, R Vaillancourt, M De Aguilar, B Potts. 2010. Age trends in genetic parameters for growth and wood density in *Eucalyptus globulus*. *Tree Genetics & Genomes* 6: 179–193. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11295-009-0239-4>

Recibido: 07.04.24

Aceptado: 23.11.24